

科学技術と知の精神文化

講演録 38-1

革新的サイバニックシステムによる未来開拓 -- テクノピアサポートの時代に生きる --

筑波大学大学院システム情報工学研究科教授
筑波大学サイバニクス研究センター長
山海 嘉之

2015 年 12 月 8 日

国立研究開発法人科学技術振興機構
社会技術研究開発センター

「科学技術と知の精神文化」研究会

講演録の発行にあたって

世界的に大きな時代の転換期に直面している現在、日本の科学・技術に携わる人々とその共同体の精神・規範・文化について、歴史に学びじっくり議論をし、将来を考える場が必要なのではないだろうか。

阿部博之 東北大学名誉教授のこのような発案により、社会技術研究開発センターは研究会「科学技術と知の精神文化」を設置し、2007 年度より継続的に会を開催しています。

研究会では、学問・科学・技術を取り巻く今日までの内外の言説、活動、精神、風土などについて、理系だけでなく、科学史・哲学・歴史学・法学・政治学・経済学・社会学・文学などの多様なバックグラウンドの有識者の方々にご講演いただき、議論を深めてきました。

本講演録は、研究会での講演をもとに、講演者の方々に加筆発展し取り纏めていただいたものです。21 世紀に日本の科学・技術を進めるうえで基盤となる知の精神文化について、より多くの人々が考え互いに議論を深めるきっかけとなることを願い、発行いたします。

国立研究開発法人科学技術振興機構
社会技術研究開発センター

目 次

はじめに	1
科学者への道のり	2
科学技術が突きつけた課題～生命とは何か	4
新たな学術分野の立ち上げ	6
サイボーグ型ロボット HAL	8
医療機器への道のり	9
HAL を用いた臨床	11
医療機器 HAL 誕生・そしてグローバル展開へ	13
異分野融合で動き始めた科学技術の連携スパイラル	14
無限の可能性と科学技術がはらむ危険性	16
2040 年に向けた挑戦～医療イノベーションの推進	18
プロフィール	20

革新的サイバニックシステムによる未来開拓 --テクノピアサポートの時代に生きる--

筑波大学大学院システム情報工学研究科教授
筑波大学サイバニクス研究センター長
山海 嘉之

日時：2015 年 12 月 8 日
場所：国立研究開発法人科学技術振興機構

はじめに

本日の講演は、大きなテーマとして「科学技術と知の精神文化」というタイトルがつけられているのですが、具体的には、科学者の精神、規範、倫理の在り方ということだと思えます。これからいくつかお話しさせていただきますが、実はそういうものがバックグラウンドでかなり重要であるということも、少し触れながらお話ししたいと思います。

今日私がお話しさせていただくのは、「革新的サイバニックシステムによる未来開拓」についてです。社会が直面する課題を解決する技術を創りながら、その技術で新産業を創出し、同時に分野改革をする人材育成を進めていくという3つを柱にしながら日々チャレンジをしています。

社会にはすでに、IT 機器やロボット、人工知能など、さまざまなテクノロジーが入り込んできており、私たちの暮らしはそういったテクノロジーとともに、また次の段階に進んでいくこととなります。したがって、私たちが到達していく未来は、どういうテクノロジーを創るかによって変わっていくということになります。そういった意味で、未来をきちんと見据えたテクノロジー創りが重要になってくるのです。また、人とテクノロジーが共生し、相互に支援しあう新しい概念である「テクノピアサポート」という分野開拓も重要になってくるということで、「テクノピアサポートの時代に生きる」という副題にしました。

ここ4～5年間ずっとそこを見据えています。1つのマイルストーンとしては、「重介護ゼロ社会」というキーワードをつくってみましたが、そういう社会を実現させるために必要な技術づくりにチャレンジしています。実はそこにはかなり際どく見え隠れするものがありますので、そこを含めてお話しできればと思っています。

科学者への道のり

私が小学校3年生の時に、今の道に進みたいと思ったきっかけとなった本がありました。『I,Robot (われはロボット)』という漢字の多い本でしたが、辞書を引きながらなんとか読みました。次の年には子供バージョンが出て、大きくなったらロボットをつくる科学者になりたいと思っていました。それ以降、色々な国の言葉で書いてある本を趣味で集めているのですが、実はアイザック・アシモフという人が、「ロボット工学3原則¹」という言葉や「ロボット工学という分野(名前)」をSFの中でつくっていくのです。アシモフはすでに亡くなっているのですが、昨年、『I,Robot (われはロボット)』の翻訳者である小尾英佐さんから、人を介して絶版になった本をお送りしたいというご連絡がありました。『I,Robot (われはロボット)』は、小尾さんの初めてのSF翻訳のお仕事でもあったそうで、不思議なご縁を感じました。今月の末に本を頂戴したお礼も兼ねてお会いする約束をしているのですが、少年であった私といまの私とをつないでくださるお仕事をしてくださった方がここにいらっしやると感じています。この本を読んで、小学生の頃から大きくなったら科学者になろうと思っていたのですが、その夢が叶い、大学にはサイバニクス研究センターを設立し、そして研究開発型の企業「CYBERDYNE」という会社をつくって未来開拓にチャレンジしています。

ロボットには2種類ありまして、1つは操縦をするロボット、もう1つは「鉄腕アトム」のように自分で動くロボットです。今日お話しする「HAL (Hybrid Assistive Limbs)」というロボットは、人間の脳神経系の情報を使いながら装着者の意思で随意的に動くロボットで、さらに自律的に動く機能もあり、この2つが混在して機能します。HALのHはHybrid、つまり混在という意味です。偶然にも、小学生の頃に「夢」と題して文集に書いたことと同じような道を歩んでいます。当時から、科学技術というものは社会への影響力が非常に大きいと思っていましたので、文集の末尾には「科学とは悪用すれば怖いもの」と、子供なりの科学者倫理、研究者倫理みたいなものにも触れていたりします。こういう思いは今もあまり変わっておらず、人材育成を担う組織、例えば文部科学省もそうですが、そういう組織ではもっと早い段階で子供たちにそういう思いがきちんと刻まれていくような流れができればいいなと思っています。

¹ アイザック・アシモフ (Isaac Asimov, 1920年-1992年) は、アメリカの作家、生化学者。「ロボット工学3原則」とは、アシモフのSF小説において、ロボットが従うべきとして示された原則で、ロボット3原則とも言われる。「人間への安全性、命令への服従、自己防衛」を目的とする3つの原則から成る。

ちょうどこの頃、「サイボーグ 009」というテレビ・アニメが始まりました。アニメに登場するサイボーグには、当時は実現できそうもない人工臓器がいろいろと搭載されていました。今や欧米では人工心臓も埋め込みでポシットを付けて歩いていて、移植待ちの状況になってきています。こういう技術は、SFでは「サイボーグ 009」の通常の人間の能力を超えるようなものなのですが、実際には生命維持というレベルで使われています。例えば人工呼吸器は生命維持を可能にしましたが、ALS²の患者さんの生命維持では首に穴を開けて呼吸を支援するような状況です。それを付けるときには、付けるかどうか、付けなければ死んでしまいますので、そこで「生」と「死」の選択をさせられるのです。一旦付けてしまうと今度はさまざまな理由（倫理、ルール等）から、外したくても外せないという難しいところがあって、実は科学技術はいつも生死の選択のようなことと背中合わせにあるという状況です。

石ノ森章太郎さんの「キカイダー」という漫画がありました。キカイダーは完全にロボットなのですが、それを生み出した博士は一生懸命頑張って人工知能をどんどん発達させて、人の良心を組み込もうとする研究成果として出来上がっていきます。しかし、博士はキカイダーの開発中にさらわれてしまい、このロボットの電子頭脳は未完成の「人の良心」を模した人工知能のままになってしまったのです。そして、博士の脳はハカイダーというロボットの頭脳に組み込まれてしまいました。つまり、ハカイダーはロボットではなく、サイボーグであって、生きた人間の脳がロボットと一体化している点から、人間と言えます。実は、ハカイダーには血液を循環させるシステムが入っているので15分ぐらいしか戦えないのです。そういう、一方はロボット、他方は基本的に人間、人間とキカイが一体化した状態をサイボーグと呼んだりもしますが、こういったことがテーマになったストーリーでした。面白いのは、このロボットは良心回路という人の心の回路を持っているので、結局、毎週、毎週苦悩するロボットに変わってしまっているのです。つまり人工知能を発達させるということは、便利な道具にしていくという側面があるのと同時に、人間の性質を入れ込むことによって本当に必要かどうか分かりにくい技術に発達していくということが、ちらちら見えていました。

² ALSは筋萎縮性側索硬化症と呼ばれ、身体を動かすための神経系（運動ニューロン）が変性する病気。神経細胞あるいは神経細胞から出て来る神経線維が徐々に壊れ、神経の命令が伝わらなくなって筋肉がだんだん縮み、力がなくなる。【日本ALS協会】

科学技術が突きつけた課題～生命とは何か

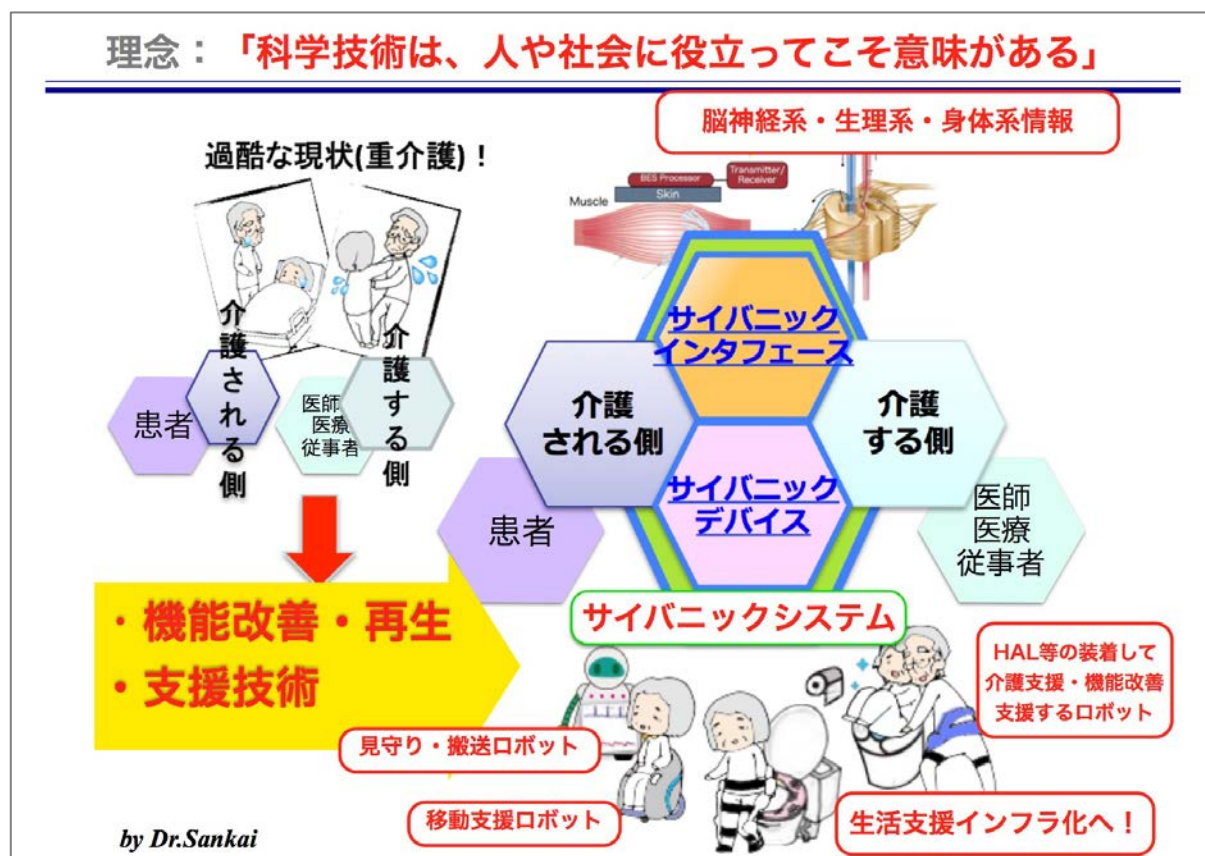
アシモフの作品で、「バイセンテニアル・マン（2世紀生きた男）」というのがあります。これは映画にもなっていますが、かなり独特なストーリーです。お父さんがロボットを買ってきて一番下の娘がとても気に入るのですが、ずっと生活する中で学習していき、時計を作ったり、木を彫ったりといろいろやるのです。お父さんは、このロボットのために口座を開き、彼がつくった時計とかを売ったお金は全部彼の口座に入れていたのですが、10年、20年、30年たつうちに一緒に暮らしていた家族はみんな死んでしまいます。お父さんの遺言で彼は結局、その口座の通帳をもらって自由旅に出るのですが、長い年月が経ったころ、昔かわいがってくれていた一番下の娘の孫と出会い、恋に落ちる話になります。最終的に裁判所に結婚の申し込みをするのですが、裁判所はそれを当然拒否するわけです。人間とロボットは結婚できるわけがないと。ただ、そこで議論となってくるのは、人間とは何か、ロボットとは何かということです。彼は、大切な家族がみんな歳を取って死んでくことを残念に思っていたので、稼いだお金で一生懸命研究をして人工的な合成細胞、今でいう再生医療などを使って細胞や工学技術で構成したいいくつかの人工臓器をつくって、社会で利用してもらえるようにしていました。実は、その映画のなかの裁判官といえども、彼の技術で130歳とかを維持しながらみんな長生きをしている時代になっているのです。裁判では「人とは何か」「ロボットとは何か」の話が繰り返されていました。彼は結局何を選ぶかと言うと、自分の愛する人がどんどん歳を取って死んでいく中で、とうとう自分の体を自分がつくった人工の臓器で置き換えていくことによって限りなく人間に近づき、最後には死ぬような道を選ぶのです。これによって、最終的に最高裁で愛する人との結婚が認められるというような話でした。

実は、こういうことが私たちの身の回りでだんだん起き始めているのです。例えば「人間とは何か」「生命とは何か」ということに対して、科学技術は、生命とか生物を物質とか情報の配列に替えていくのだということをととう突き止めてきています。あるいは人間がロボットとか人工臓器とかいろいろやっている中で、どんどん人間のようなものをつくりたいということで、人工知能をもったヒューマノイド³というようなものも登場してきているわけです。こういうことをやることによって逆方向の流れもではじめています。こういう技術

³ ヒューマノイド (humanoid) とは、形容詞としては「人間そっくりの」や「人間によく似た」という意味で、名詞としては、人間に似た生物や人型ロボットなどを指し、SF やファンタジーの作品に頻繁に登場する。

が、人工臓器とか再生医療とかロボット工学とかいう分野になっていますが、今度はそれを使って、生き物とか人間というものをもう1回見直そう、あるいは再構成してみようという流れが出ています。ただ、ここまで来ると、これでいいのかという疑問も出てきていて、おそらくそれが、アシモフの作品のような議論と重なってくるのではないかと思います。では、どういうテクノロジーがいいのかということですが、やはり人間を中心に据えたテクノロジーが大切なのだと思います。私自身は、「サイバニクス」という、人を支援していくことにフォーカスした技術づくりに舵を取ってこんにちに至っています。文部科学省が最も強化する教育拠点「サイバニクス国際拠点」として選ばれ、さらに大きく発展しています。

ではどんな技術が出来上がってくるかということをご説明します。私たちが直面する社会課題に少子高齢ということがあります。特に2055年代になると国民の40%以上が65歳以上という激しい時代になります。そこを乗り越えていくための技術は5年や10年ではできないので、今から準備をしてバトンタッチをしようとしています。「テクノピアサポート」という新しい概念で表される、人とテクノロジーが共生し互いに支え合う社会はますます加速されると思いますが、そこでどうするかと言うと、「科学技術は、人や社会に役立ってこそ意味がある」という基本的な理念をベースに、人間が持っている身体機能そのものを維持する、あるいは改善していくということをできるだけやっていくというのが1つです。



新たな学術分野の立ち上げ

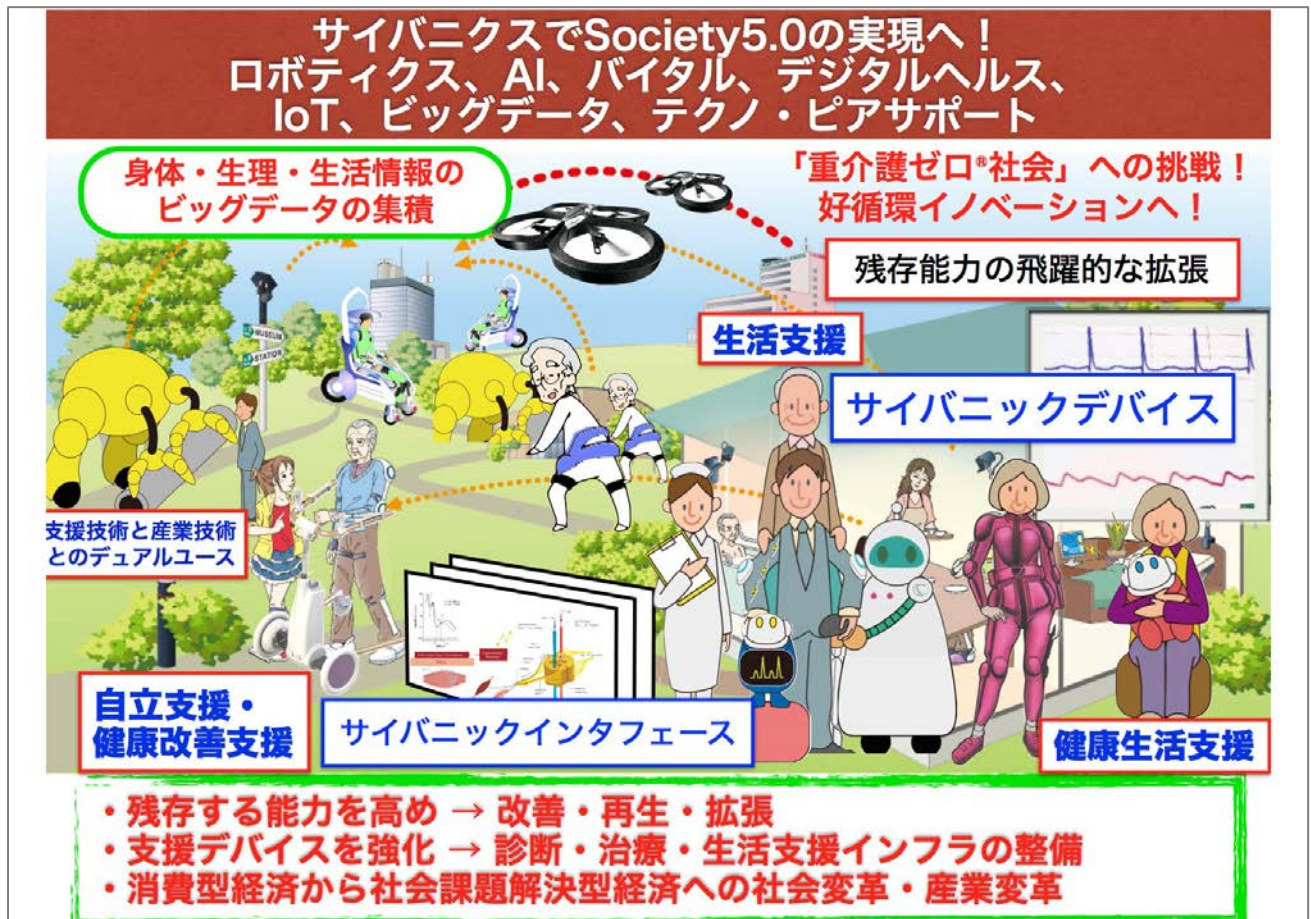
もう1つは、そういうことをやっていくために、脳神経系とか生理系とか身体の機能がどういう状況であれば脳神経系や身体機能や生理機能が高まるかという研究と、そういうものを日常的に支援できる技術をきちんとセットにしてつくり出していくということで、人間の脳神経系からロボット、生活環境に至るまでを包括する、新学術領域・革新的研究開発領域づくりが必要となってきました。

ところが、子供のころからそういうことをやりたいと思って頑張って勉強し、大学でちゃんと専門家になったのに、そこで何が起きるかと言うと、非常に小さな狭い分野の中でやっていかなければならなくなるという事態が起きてしまうのです。そういう状況では、社会が抱えている複合課題が解けないのです。仕方がないので、新しい分野づくりが必要ということで、「サイバニクス」という学術分野を創ろうとしたのです。ところが、大学で学術分野をつくるのは当たり前かと思ったら、逆に周りから変に思われるのです。なぜ学術をつくるのですかという言い方です。日本は明治以来、基本的に学術を輸入するのに慣れている国だったからだと思います。ただ、そこについては文部科学省も含めて新しい分野を創るということで、人に対する「物理的インタラクション」と「情動的インタラクション」を1つの塊にした「サイバニクス」という分野を創ることにしました。実はこの力学的なやり取りと情報のやり取りでほぼ全て終わるのです。ここには、脳神経科学から行動科学、ロボット、生理学、心理学、感性や法律や倫理や哲学、経営、こういうものが全て入らないと社会に対してきちんと還元できるような技術になりません。そこで、そういう先生方にお声掛けしましたら、幸い皆さん喜んで入ってくださり、ミーティングが結構楽しいミーティングに変わりました。全く違う話がいつも飛び交う、そういう分野がやっと出来上がりました。このサイバニクスという分野で博士号を取った学生の殆どが、先ほどご紹介した、大学発ベンチャー企業である CYBERDYNE でそれぞれがプロジェクトリーダーとして新分野開拓で活躍するという、イノベーションのエコシステムができ始めています。

新しい学術分野を作るときに、最初の段階から「サイバニクス倫理委員会」というものを設置して、きちんと社会的な同意が得やすいように準備もしてきました。筑波大学に初期の段階から申し入れをして、医学だけではなくて工学の分野にも倫理委員会を立ち上げてもらいました。倫理委員会を立ち上げると何がいいかと言うと、結局そこに働く人たちがみんな

かかわることになりますので、そういう意味ではかかわっている人たちの意識がだいぶ変わってくるようになります。

こういうことを通して分野開拓をすることになりますが、最終的な出口としては、この絵のようなものを想像しています。



これは、かなり未来の話だと思われるかもしれませんが、私自身はだいたい5年ぐらい先には実現したいと思っています。5年先にこんなになるのかと思うとちょっとびっくりかもしれませんが、一部でこういうことが実際にできるようなフィールドも準備できていると思っています。本当に社会がこうなってくるには、さらに5年ぐらいかかるかもしれません。ここで人の残存する能力を高めていくこと、支援装置をきちんと強化して診断や治療や生活支援ができるようにすること、そして、物をたくさん売れば経済が回るという今の「消費型経済」という流れではなく、社会課題を解決すること自体が1つの経済を創り出していくような社会、これを「社会課題解決型経済」と名付けましたが、こういう社会に変革することを目指しています。そういったものは既に現れていて、CYBERDYNEは文科省・文科大臣が指定

する指定研究機関にもなっていて、そういうことを期待する人たちが集まる会社になっており、ソーシャルビジネスの企業として仕上がってきています。

サイボーグ型ロボット HAL

さて、本日の講演のメインとなるサイボーグ型ロボット「ロボットスーツ HAL」ですが、これは脳神経・筋系の機能改善治療を行う世界初のロボット治療機器として認証を取得しています。ヨーロッパ全域での認証、次いで日本ではこの11月25日に薬事の承認を得ました。これまでどういうことをやってきたかをお話します。

こういう研究は、基礎研究と実用化のところでだいたい文部科学省や経済産業省の役割が終わってしまい、あとは企業に任せるようになるのが普通です。しかし、目の前にマーケットがない世界だとそうはいかないのです。きちんとした経済サイクルができるところまで持っていけない限り社会実装できるような状況になりません。従って、一気に株式上場まで持っていく必要がありました。株式上場することの意味は、そこに加わる金融・証券の方々をはじめ、それに携わる多くの方々が1つの経済サイクルをつくれるだろうということを保証してくれるということです。そうでないと、なかなか上場できないですから、厳しい審査を通過させる必要があります。なおかつ、大学発ベンチャー企業のあり方を私なりに考え、社会課題を解決するという理念を追求できるようにするために、株主が右へ左へと簡単に会社経営の軸をぶらすようなことが起こりにくいように「複数議決権」という仕組みにしました。議決権の違う株式によって上場することで会社が掲げる理念を追求しやすいことになりました。

これが、軸ぶれせず社会課題を解決し続ける企業の新しいあり方だということで、昨年はトムソン・ロイター⁴から「IPO⁵ of the Year」という賞を頂戴しました。今年はさらに、社会にきちんと展開するときの資金調達の方法に関して、投資家の方にも喜んでもらえるような方法を発明しまして「Innovative Equity Deal of the Year」という賞を頂戴しました。2年連続の受賞というのは初めてだそうです。

⁴ ニューヨークに本社を置く国際的な大手情報企業。

⁵ Initial Public Offering の略で、株式市場に新しく上場すること。

こういうことをしながら、さらにISO⁶という組織の中で世界ルールを策定する側に回り、そのルールを使って認証してもらおうなどということを手探りで乗り越えながら進め、一つ一つピースを埋め、その結果、振り返ると未開未踏だったところに道筋ができあがっていきました。

HALの原理をご紹介します。人が体を動かそうとすると、脳から体を動かさないという信号が脳、脊髄、運動神経、筋肉と流れていきます。私たちの体というのはこうやって自由に動くわけなのですが、ひとたび脳神経系に病気が出てしまうと体が動かなくなってしまう、あるいは動きづらくなってしまいます。HALは特殊な超高感度センサーを持っています。体の中に針を刺して見るぐらいの高感度なセンサーです。実際には皮膚に貼るとかサポーターで巻くといった方法でこの微弱な情報を取ることができるようにしました。このセンサーで人の体から取り出した情報をロボットの中で整え直し、それをもう一度人に戻します。人の脳神経系と筋骨格系の間にロボットが入りこむことによって、本来、体の中を回っているループをロボットを介在させながら回すという、人とロボットの一体化技術をつくり上げたわけです。この原理そのものが特許になりまして、さらに自動車や電気製品なども含めた全ての特許の中から最高の特許に選んでいただきました。そういう意味では日本は今、非常に強い特許を持っているということになります。

医療機器への道のり

HALを使うことによって、人の身体、特に脳神経系の機能が改善されるということを示していくためには、実はかなり大変なことが1つあります。医療機器水準のものをつくって、病院とか医療機関で医学的効果を証明しなければいけないのですが、大企業にお願いしても、目の前にマーケットがない世界に対しては、「素晴らしいですね」とは言ってくれても実際動いてはくれません。仕方がないので大学発ベンチャー企業をつくって進めることにしました。ちょうど法令なども調整され、大学発のベンチャーが全てを積極的に進めなさいという段階にありまして、大学からポンと押されました。会社などどうやってつくるかも何も分からず、会社法の勉強や定款とは何かから勉強し始めて、とにかく勉強する機会が増えました。

⁶ 国際標準化機構（略称：ISO）は、電気分野を除く工業分野の国際的な標準である国際規格を策定するための非政府組織。

時間はかかりましたが、おかげをもちまして医療機器をつくることのできる会社として出来上がりました。つくば市で医療機器をつくることのできる会社を1つ設立して、そこで開発したロボットを使って臨床の世界に入っていくことになります。ヨーロッパではすでにドイツ、スウェーデン、デンマークに会社を準備し、今、時価総額が3,800億円ぐらいの会社になっています。おかげで基礎研究や次の研究開発がさらに加速するようになりました。

HALを健常者が装着し、体を動かそうとすると、脳、脊髄、運動神経、筋肉、ロボットの順に神経の情報が伝わって行ってロボットが動きます。健常者の場合はそれでいいのですが、病気の方はそうはいきません。動かそうとしても体が動かないわけですから、健常者である被験者にも体を動かさず、「動かそうというような思いだけをしてください」と言うと、それでHALが動いてくれます。このことからわかるように、体を動かさなくてもHALに命令が伝われば動いてくれるわけですから、体が動かない患者さんが身に着けて動こうとすると、患者さんの脳神経系から情報を受けてHALが体を動かしてくれることになります。

これを使って治療をし、データを取得・集積するのですが、やっとデータがまとまってきたところに認証機関できちんと医療機器に認証してもらおうと思ったところ、このような革新的なものに対しては世界ルールがないために、その先へと進まないのです。こういう新しいものが出てくると、ISOという国際標準化機構のメディカルロボットの委員会の中で新しいルールをつくっていくことになります。私たちは最初からそのメンバーではありませんでしたが、新しいものができたときだけオブザーバーで呼ばれることがあります。1回だけのチャンスだと思い、そのときにISO側にとってもプラスになるような発言をしながら説明していると、エキスパートメンバーになって、世界ルールをつくる側になってほしいということになりました。こうして私たちは、ISO側のエキスパートメンバーとして世界ルールを策定するようになりました。日本にとっては画期的なことです。

こうして、メディカルロボットやパーソナルケアロボットの世界ルールを一旦つくり、つくったあとに世界初の医療機器としての認証を得ていくということを繰り返していくことができるようになりました。その後、メディカルロボットだけでなく、生活でも使えるようなパーソナルケアロボットの認証も策定することになりました。これまでの社会は、医療と非医療の世界がきれいに分かれていました。しかし、高齢化が一層進んでいくと、病院と家、あるいは病院と職場の、行ったり来たりを繰り返しますので、医療と非医療の間のグレーゾーンがどんどん大きくなっていくような状況にあります。そういう意味では、生活のところ

にまできちんとこういった規格が入っていくことがかなり重要な時代になっていると言えるでしょう。

研究開発を進めていくときに、単に実験室だけでやっていくというよりは、きちんと社会に実装するために必要なものを一つ一つ押さえていくということが重要だと考えています。政治的なことや政策的なことも重要で、乗り越えなければならない異質なハードルを非常に良い連携で飛び越えたりつないだりできるようになってきているように思います。麻生大臣や山本大臣をはじめ、国内外で10人ぐらいの大臣がCYBERDYNEに来てくださって、イノベーション推進や新分野開拓に必要なさまざまな課題とその解決法をご説明させていただく場の1つとなりました。少し前になりますが、「ロボット革命実現会議⁷」という会議体ができまして、更に、その推進母体として「ロボット革命イニシアティブ協議会」という協議会も、私はその評議員とか幹事とかをしながら、イノベーション推進や新領域開拓に力を注いでいます。

HAL を用いた臨床

ポリオ⁸の患者さんの事例で分かりやすいのがあります。生後11カ月でポリオに感染し、それ以来50年間脚を動かすことができなかった患者さんです。脚がぶらぶら状態ですから、こういった方が体を動かせることは世界でも事例のないことです。HALを使うとどうなるかと言うと、1日、2日と経つうちに1ミリぐらいピクッと動くようになり、とうとう3日目ぐらいで動き始めて、脚を途中で止めることまでもできるようになりました。ポリオのウイルスは運動神経を壊すのですが、ほんの少しだけ運動ニューロンが残っていて、そこにHALを使うと、ほんの少し残っている残存機能が徐々に改善されるようになりました。家に帰ってHALを外してベッドで横になっても脚が動くようになってきているという状況です。

また、脳卒中を起こして4年間体がカチカチになって動かなかった方にもHALを提供しました。脳卒中を起こした場合、直後は、体がぶらんとするのですが、1月、2月、3月と

⁷ 「日本再興戦略」改訂2014に位置づけられた「ロボットによる新たな産業革命」実現のアクションプラン策定のため、内閣総理大臣の下、設置されたもの。【さがみロボット産業特区】

⁸ ポリオウイルスの中枢神経感染により生ずる四肢の急性弛緩性麻痺（acute flaccid paralysis：AFP）を典型的な症状とする疾患。

たっていくと、多くの場合、体が固くなってきます。これは、脳の上位中枢から命令が行かなくなり、局所的に別の異常な神経ルートが出来上がるからで、それが体をカチカチにさせるのです。ですからどんなにほぐしても基本的なところは良くならないのです。これは会社で言えば、執行部に問題があると、次第に各部局が勝手な動きをするようになってしまい、執行部の機能が多少改善されても言うことを聞いてくれないというのと同じような状態です。脳脊髄炎で中枢神経に大きなダメージを受け、4年間筋が拘縮し、寝たきり状態のこの患者さんに対して、ボトックスという薬と、革新的なロボット医療機器HALの組み合わせを試みました。ボトックスで何をやったかと言うと、運動神経と筋肉の間のシナプス⁹結合を弱めるのです。ボトックスは、筋弛緩剤とも呼ばれますが、これによってぶらんとするので、もし上位中枢に回復機能が少しでも戻ってきていれば、命令が伝わるはずなのです。ただ、シナプス結合が弱くなっていると、普通は筋肉は動かないのですが、ポリオの患者さんでも動いたわけですからHALを使えば動くはずです。こうしてこの患者さんは、2週間後には歩行訓練ができるようになりました。

また別の患者さんで、脳卒中を2回起こし、カルテには「歩行の再獲得は困難」と書かれた方ですが、HALを使用し始めて2カ月後には、病院の廊下でジョギングできるまでの状態に回復しました。この方も、最初はぶらんとした状態から、現在は日常生活が普通に送れるようになっています。

脳の状態についても多くの患者さんについて調べたのですが、HALを使う前は、過活動といって、頑張ろう、頑張ろうとしていろいろなところが異常活動を起こしていましたが、HALの助けで適切どころが興奮したときだけ反応するようにすると、すぐにそこがピンポイントで動けばいいということで、脳神経系のつながりが改善できて、脳内の過活動という異常状態がスーッとなくなってくるということも分かってきました。筑波大学は国立大学の病院ですから、だいたい急性期や亜急性期の患者さんしか入院できません。その後は回復病院に移動して普通の治療を受けていき、だいたい頭打ちになったところで退院となるのですが、ここでHALをさらに使いますと、このようにまた身体機能が回復していくということも分かってきました。

こんなことをしながら、脳機能変化を解析したり、身体機能の変化をいろいろなスケールで調べたりしています。このようなことと並行して、今度は医療機器につながっていくために、社会の仕組みの中で許認可を得ていくことになります。こういったトランスレーショナ

⁹ 神経情報を出力する側と入力される側の間に発達した、情報伝達のための接触構造。

ルな仕組みをうまく回さない限り、どこかで詰まった瞬間に社会の中に科学技術が実装できなくなってしまう。こういったところも研究を進める上ではかなり重要だと思っています。一例ですが、レギュラトリーサイエンス¹⁰という分野なども、今後重要になってくるでしょう。今は世界のルールを持ってきて日本に当てはめているのですが、今後は世界ルールをつくる側に回らないといけません。新しい装置ができれば、自分たちからもその装置の評価にぴったり合った評価方法をつくり出すくらいの人材が必要です。最終的には人材だと思います。このように考えると、ここはもうルールのみの問題ではなく、人材育成も含め、好循環のサイクルをつくっていくための仕組みづくりといった大きな問題となってきたような気がします。

医療機器 HAL 誕生・そしてグローバル展開へ

こうして HAL は、ヨーロッパ全域で医療機器になり、ドイツでは既に公的な労災保険も適用されています。この 1 台の装置でだいたい治療時間が 1 時間から 1 時間 30 分ですので、1 日当たり 5～6 人に使われる状態になっています。どうやって治療しているかご紹介します。体の状態が「8」という状態から「18」になった脊髄損傷の方の例です。最大は「20」です。この方が HAL を外したときにどうなったかという、最初は介助者の方がいないと立つことも歩くこともなかなかできなかったのですが、HAL の治療が 60 回終わると、杖を使って自分でトイレに行けるようになりました。自分でトイレに行けるだけでも大きな進歩ですが、今はもう職場にも行けるそうです。そうすると、介護ヘルパーの方は巡回型で対応すればよいことになるので、常勤で介助者を雇用する必要性がなくなり、公的な費用が圧縮できるということをドイツでは 1 年半ほどかけて調べ、それで保険が使えるようになりました。1 回 1 時間ほど治療するたびに 500 ユーロが労災保険から 100% 支払われるという状況になっています。

日本、ヨーロッパの次に、アメリカで医療承認を取っていきます。実はこの 3 つの地域だけで世界の 600 兆円を超えるメディカルマーケットの 70% 以上を占めています。どうしてこの 3 つの地域で先にやるかという、これらの地域は医療の承認を得る仕組みが結構厳し

¹⁰ 科学技術の成果を人と社会に役立てることを目的に、根拠に基づいた確かな予測、評価、判断を行い、科学技術の成果を人と社会との調和の上で最も望ましい姿に調整するための科学。【第 4 次科学技術基本計画 平成 23 年 8 月 19 日閣議決定】

いのです。世界各国の医療承認の仕組みは、CE 系（EU 規定）か FDA 系（米国規定）に分かれますから、ここで通過させておけば、あとはスッと広がっていくのです。もう EU は終わりました。米国の FDA も、申請は手続きを段階的に進めていますので、近いうちに認可されるのではないかと思います。

このように、1つの科学技術を社会にきちんと展開しようとする、ここまでのことをやり抜いていかなければなりません。進める者の意識として、生み出した科学技術をしっかりと社会実装していく覚悟が求められています。どこまでやり抜くかというところを、先を見通しながら意識しておくことが必要だと思います。

実は、11月10日のニュースで、神経・筋難病患者の脳神経系・歩行系の機能改善治療を行うロボットスーツ HAL が紹介されました。そこでは、厚生労働省が装着型のロボットでは初めて医療機器として承認する方針を決めたと報道されましたが、その後11月25日に、ついに新医療機器として承認されました。この方は進行性の難病で、一般の方の10倍、20倍の速度で人生を終えてしまわざるを得ないような難しい病気なのです。こういう進行性の病気がいろいろあるのですが、日本では、こういった有効な薬や治療方法がないとされている方に対してまず治験をやってほしいということになりました。その結果、進行速度が抑制されるというだけではなく、むしろ回復、改善のところもかなり効果が出てきましたので、非常に良い結果になったと思っています。ドイツでは患者さんが多いところからやってくださいという別の意味で難しい宿題を頂戴しました。ドイツでは急性期、回復期、慢性期、全ての脊損患者さんに保険が使えるようにするため、公的労災保険から医療保険へシフトさせるための申請手続きに入っているところです。

異分野融合で動き始めた科学技術の連携スパイラル

先ほどは薬とロボットの組み合わせを紹介しましたが、再生医療とロボットの組み合わせにもチャレンジしています。交通事故で脊髄が完全に切れて2センチもギャップがある患者さんに対して、嗅粘膜細胞という自家幹細胞¹¹を使った治療をされていましたが、嗅粘膜細

¹¹ 幹細胞とは、分裂して自分と同じ細胞を作る能力と別の種類の細胞に分化する能力を持ち、際限なく増殖できる細胞と定義されている。

胞には幹細胞が少ないのであまりいい状態ではありませんでした。関西の大学で1年数カ月治療されたあと、この患者さんは私たちのところに来られましたが、そのときは下半身がぶらぶら状態でした。なぜかという、完全脊損で脊髄に2センチのギャップがあるからです。いくら幹細胞が含まれている嗅粘膜細胞を入れたとはいえ、細胞がつながるかどうかは細胞まかせですし、つながったとしてもほんの少しかもしれません。

さて、この患者さんの状態を調べてみると、両脚の膝のところに極めて微弱な生体電位信号が両脚同時にピョコッと検出できることが時々あったので、HALによる治療を繰り返し適用してみました。HALを継続的に使っていくと、しばらくするときれいに左右の区別ができるようになり、とうとう自分の意思で、たまにですが脚を動かせるようになりました。半年、8カ月と過ぎていくうちに腿の辺りにも小さな生体電位信号が出てきたので、こういう方法に可能性があるのだということが分かってきました。この方は、HALを外して、200m～300mほどは自力で移動できるようになり、脳の状態も変わっていましたが、神経のつながり方は細胞まかせですから限界があります。

そこで、今度は切れた中枢神経をつなぐ技術を考えてみようと思いました。イギリスの論文でも、嗅球鞘細胞¹²による類似の方法での成果が発表されました。幹細胞の影響よりも、きっと一緒に入っているフィブリン¹³と言われるもののネット構造が、神経が伸びていくときにうまく足場に使っているのだろうと考えました。そこで、3次元のコラーゲン¹⁴の繊維をうまく使い、脊髄を5ミリ完全に削り取ったラットを20匹準備し、私たちの技術を入れた群とコントロール群と2つに分けました。その結果、私たちの技術を入れた群は、全て脚を小さくも大きくも動かしはじめました。これも国際ジャーナルになり、幹細胞を使わないでナノファイバーでの足場に沿って神経がのびているのだろうということも分かってきました。このとき大変だったのは、ラットの管理、神経成長物質の注入などでした。次は、幹細胞を使ってやってみようと考えています。

こういう、神経をつなぐ方法というのが1つ出来上がり、iPS細胞¹⁵のグループやほかの幹細胞のグループなど、さまざまな再生医療のグループとの連携も始まりました。これからサイボーグ型ロボット「HAL」と再生医療とを組み合わせ融合した革新的な複合療法の研

¹² 嗅球は、嗅神経入力を受け、嗅覚情報処理に関わる、脊椎動物の脳の組織。嗅球鞘細胞は、嗅球の中に存在する特殊な細胞で、脊髄損傷の治療に期待もてる再生療法である。

¹³ 血液凝固に関わるタンパク質。繊維状タンパク質で、傷などが原因となって血小板とともに重合し、血球をくるみこんで血餅を形成する。止血や血栓形成の中心的な役割を担っている。

¹⁴ 主に脊椎動物の真皮、靱帯、腱、骨、軟骨などを構成するタンパク質のひとつ。

¹⁵ iPS細胞は2006年に誕生した、新しい多能性幹細胞で、再生医療を実現するために重要な役割を果たすと期待されている。京都大学の山中伸弥教授により世界で初めて作製された。【京都大学 iPS細胞研究所】

究開発にチャレンジしていこうと思います。科学技術の1つの大きなスパイラルが動き始めているように思います。

無限の可能性と科学技術がはらむ危険性

HALの技術を健常者にも使っていく応用として、腰を守りながら長く仕事をし続けていくというバージョンがあります。一旦、1つのものを突破すると、横展開が可能となるので、こういう技術もさらに違う分野で使える技術になっていきます。今は、工場や建設現場などで実際に使えるようになってきています。あとは予防や早期発見という分野でもいろいろと技術づくりをしていて、動脈硬化とか不整脈とか血液の濃度の変化とかを無侵襲¹⁶で捉える新技術の研究開発を進めています。実は今、人間の内側情報、生理情報、脳神経系情報に関わる情報も、ビッグデータとして全て集めようとしています。HALには基本設計段階から通信機能が入っていて、日本中、そしてドイツ、スウェーデンから全データが今、つくばに集まってきています。これに今度は生理情報も入ってくるので、情報の管理技術という観点だけではなく、ここは法律家の方々とも相談しながら、適切な情報の取り扱い方というものを整理しまとめています。

服の上から心電図を測る技術も新技術として創り出しました。ワイシャツの上や背広の上から心電図が測れるということは、これを携帯電話のケースに組み込めば24時間心臓の状態を見られるということで、これで私たちの日常も管理できるということが見えてきます。こういう技術を少し発展させると、髪の毛の上から脳波も計れるので簡便に脳活動を用いることができ、脳の活動だけでロボットを操作できるということになってきます。そうすると、限られたロボット動作になるかもしれませんが、完全に寝たきりの人ですらロボットを動かすことができるわけです。この話は非常にデリケートな話で、非常に体の状態が悪い人であってもロボットを動かせるということの意味は、健常者がこの技術を通常のロボット操作技術に加えて用いることによって、ロボットの動作をさらに人間と一体化させ高度化できるようになるので、軍事にも使える可能性が出てくるということになります。

HALの生体電位計測技術をコミュニケーション支援技術としてさらに発展させ、4年間呼吸器を着けていて体が全く動かないALSの患者さんに適用した事例をお話します。セン

¹⁶ 生体を傷つけない方法。

サーをこのようにつけて、昔コンピュータで文字を打ち込んでいた時の状態を思い出しながら文字を選ぶようにしてもらいました。すると、このように文字が打てるのです。そばにいた方は驚いて「これは画期的どころじゃないですよ。3段階ぐらい飛んだブレークスルーです」と叫び声をあげられました。実はこういう技術のポイントは、以前なら亡くなっているような方が、呼吸器を着けて生命維持ができるようになったことを前提に、次の段階の技術の登場によって「人」と「技術」の大きな進化を推進する新しい技術の登場を意味するということです。実際にはコミュニケーションすらできず、この状態がいつまで続くのだろうという状態が続き、そして「サイバニックスイッチ」という革新的技術によってコミュニケーションができるようになるという一連の流れです。新しい技術が1つ生まれることによって、難しい課題を一つまた一つと越えていくという好循環スパイラルが起きているのです。その原動力は、それを推進する人の「パッション」でしょう。実はこのALSの患者さんにこの装置をお渡ししたら、今では長い文章のメールが送られてくるほどになりました。この方は、新しいデバイスを手に入れたおかげで、自らの意思を文章入力で伝えることのできる人になったわけです。

さて、次の話題ですが、東日本大震災のときに、メディカルバージョンとして開発中だったHALを3カ月ぐらいでアレンジし、50kgもある防護服をHALがその重量を支え、放射線被曝を防ぎながら現地で調査ができるようにするプロテクションジャケットというのもあります。これは鉛の防護用ジャケットで、50～60キロの重さです。防護服の中は体温が逃げないのもすごく暑く、灼熱地獄のようなので、新開発のペルチェ素子¹⁷を用いた小型冷却装置も付けて、15kgのガンマカメラを抱えて放射線源のある場所を調べます。実際、福島第一原子力発電所所長や管理企業の現場責任者にも使ってもらっていました。今は局面が変わり、廃炉に向かっていますから、技術もそれに合わせて変えていて、働く人の生体状態も分かるようにしたり、さらに、マスタースレーブ方式¹⁸の遠隔操作型ロボットなども準備してみました。しかし、ここまでくると、だんだん平和利用としては限界にきています。実はこれまで、このような技術が表に出た段階で色々な国から軍事用途でのオファーがかなりあったのですが全部お断りして平和利用だけにしています。

¹⁷ 冷却効果のある電子部品の一つ。コンピュータのCPUの冷却装置などに使われている。

¹⁸ 複数の機器や装置、ソフトウェア、システムなどが連携して動作する際に、一つが管理・制御する側、残りが制御される側、という役割分担を行う方式。制御する側を「マスター」、される側を「スレーブ」という。

2040 年に向けた挑戦～医療イノベーションの推進



羽田から 800 メートルに位置するエリアに医療イノベーションを推進する国家戦略特区ができました。ここに、内閣府・JST で進めている ImPACT の仕組み、文部科学省、関連する先進的研究開発型企業、大学・研究機関、地域の自治体と連携し、官民が一体的にイノベーション推進に取り組める「サイバニクス国際メディカルイノベーション拠点」をつくりたいと考えています。これによって、革新的研究開発と新産業創出と人材育成が同時展開できることになるでしょう。治験専用の病院機能、国際認証・許認可取得支援、ベンチャー支援など、医療イノベーションに必要な基本機能を集約させます。世界最先端の仕組みをつくりあげたいと考えています。我が国が目指す科学技術推進で、最も重要な案件の一つは「イノベーション」の推進です。様々な革新的サイバニックシステム（サイバニックインタフェース／サイバニックデバイス、AI、IoT、ビッグデータ処理機能などで構成）の研究開発を進めます。次世代 HAL の研究開発、再生医療と HAL との複合療法の研究開発、医薬品と HAL との複合療法の研究開発、関連する先進医療や治験などを進めるとともに、世界トッ

プクラスのスパコンの開発支援と運用、人工知能の研究開発とビッグデータ処理、そして、人工小脳の研究開発なども行っていきます。基礎研究から社会実装までを一体的に行いますが、その際には、国際規格・各種規制への対応だけではなく、規制緩和や新しい制度の設計などにも取り組む必要があります。そういった意味で、副題としている「テクノピアサポートの時代に生きる」ということはすでに始まっており、科学技術と共生する人類の未来社会のあり方が極めて重要な時代となっています。すべてがIoT化され、ビッグデータが人工知能で処理され、ロボットが対応する時代が到来しようとしています。「科学技術と知の精神文化」を考えるという段階を、そろそろ現実を超え始めているのかもしれません。

2040年には日本人の人口は16%以上減少し、65歳以上の高齢者の割合は36%に、高齢者が40%以上を占める自治体は50%になると推計されています。2055年には、全国民の40%以上が高齢者になると言われています。我が国が直面する超高齢社会の社会課題にどのように取り組むかについて、本日はお話しをさせていただきました。この社会課題を解決するための革新技術を研究開発し、それを新産業として創出し、手探りで未来開拓に挑戦できる人材育成を同時展開すること、そして、その場を作り、日本を世界で最もイノベーションに適した国とする活動を全速力で推進していかなければなりません。そのためには、まだ目の前に大きなマーケットが存在しない新領域でイノベーション（新市場創生）に取り組むチャレンジャー（ベンチャー企業、起業家など）を、官民が真に一体となって成長させていく取り組みが必要です。2040年問題にどう取り組んでいくのか。例えば、ベンチャー企業であっても、国営と民営のハイブリッド企業であっても良いかもしれません。次の世代にバトンタッチできるよう、小さくなった地球の未来開拓に、私たちは真剣に取り組んでいかなければなりません。ご静聴、ありがとうございました。

<了>

プロフィール

山海 嘉之（さんかい よしゆき）

1987年筑波大学大学院修了。工学博士。日本学術振興会特別研究員，筑波大学助手，講師，助教授，米国 Baylor 医科大学客員教授を経て現在，筑波大学大学院システム情報工学研究科教授，筑波大学サイバニクス研究センター長，CYBERDYNE（株）代表取締役社長／CEO，内閣府 ImPACT：革新的研究開発推進プログラム プログラムマネージャー。内閣府 FIRST：最先端サイバニクス研究プログラム研究統括，日本ロボット学会理事，評議員，欧文誌理事，委員長，世界経済フォーラム（ダボス会議）Global Agenda Council Member等を歴任。日本ロボット学会フェロー，計測自動制御学会フェロー。

【受賞等】2005年「World Technology Award 大賞」，2007年「経済産業大臣賞」，2009年「全国発明表彰 “サイボーグ型ロボット技術の発明” 21世紀発明賞」，2014年「2014 Edison Awards 金賞」「IPO of the Year（トムソン・ロイター）」，2015年「文部科学大臣表彰」「Innovative Equity Deal of the Year（トムソン・ロイター）」「経済産業大臣賞」「経営者賞」他多数。また、2006～2016年 総合科学技術本会議での首相・関係閣僚へのレクチャ（計3回），関係大臣・官僚および100名以上の国会議員へのレクチャなど情報還元活動多数。

人・ロボット・情報系の新学術領域【Cybernetics（サイバニクス）】を創成。サイバニクスを駆使することにより，身に付けることで人の身体機能を改善・補助・拡張・再生する世界初のサイボーグ型ロボット「ロボットスーツ HAL®」を開発。2004年6月には，最先端ロボットやサービス等の研究開発・製造・販売を行う未来開拓型企业「CYBERDYNE（サイバーダイン）」を設立。欧州では，HAL 医療用が2013年8月に世界初のロボット治療機器として医療機器 CE マーキング(CE0197)認証を取得し，ドイツでは公的労災保険の適用という快挙を達成し，病院での機能改善治療に利用されている。2014年3月には，日本初の議決権種類株式で株式上場を達成し，高い技術力と成長性が評価され，2013年度の「IPO of the year（トムソン・ロイター）」を受賞し，2014年度は新たな資金調達手法が評価され「Innovative Equity Deal of the Year（トムソン・ロイター）」を受賞。2015年11月には HAL 医療用が新医療機器として日本で薬事承認され，2016年1月には神経筋難病疾患を対象とした進行抑制治療処置への保険適用が決定している。

社会技術レポートは、国立研究開発法人科学技術振興機構社会技術研究開発センターが不定期に発行しているものです。本レポートの複写、転載、引用にあたっては、社会技術研究開発センターにお問い合わせください。

科学技術と知の精神文化

講演録 38-1

科学技術と知の精神文化
講演録 38-1

革新的サイバニックシステムによる未来開拓
-- テクノピアサポートの時代に生きる --

筑波大学大学院システム情報工学研究科教授
筑波大学サイバニクス研究センター長

山海 嘉之

国立研究開発法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター
〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザビル 4 階

TEL 03-5214-0130
FAX 03-5214-0140
URL <http://ristex.jst.go.jp/>
2016 年 3 月

Copyright©2016 JST 社会技術研究開発センター